

硬性与理性： 电机智能控制技术

● 刘建林 陈杰金 王燕燕 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

硬性与理性： 电机智能控制技术

刘建林 陈杰金 王燕燕 著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

硬性与理性: 电机智能控制技术/刘建林, 陈杰金, 王燕燕著. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 9

ISBN 978-7-5682-3065-0

I. ①硬… II. ①刘…②陈…③王… III. ①电机-智能控制 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 211179 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 8.25

字 数 / 190 千字

版 次 / 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 33.00 元

责任编辑 / 封 雪

文案编辑 / 封 雪

责任校对 / 王素新

责任印制 / 马振武

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

在现代社会中,电机在机械、运输、电子、冶金、化工、纺织、印刷、造纸、控制设备、微机产业、家电产业、农业等领域内得到广泛的应用。此外,随着现代高精端科技的不断发展,电机的种类、规格、性能也在发生日新月异的变化。电机智能控制技术作为电机领域一门重要的学科,引起了人们越来越多的关心和重视。

当前,我国在电机智能控制领域得到了突破性进展,但是,在很多方面仍存在着缺陷和不足。为了能够在电机智能控制领域实现更高层次、更快速度、更加科学的发展,相关领域应该跟上时代的步伐,与时俱进,不断开拓进取,从硬性与理性的角度出发来对电机智能控制技术进行全方位的解析,从而为我国电机智能化控制技术打下坚实的基础。

除了要发现问题、解决问题之外,在电机智能控制技术领域还要融入各种科学的方法,以求得最大的进步与发展。在实际研究中,一些复杂的电机智能控制技术是无法用传统方法进行描述的,需要借助一些数据、参数和模型。为此,一些专家和学者就从实践中得到启发,提出一些诸如人工智能控制技术的一些新的控制技术,如专家系统、模糊逻辑、人工神经网络、遗传算法等。本书中还着重介绍了直流、交流电机的控制技术、产品及其应用。

随着近几十年来电子技术、微型计算机技术以及控制理论的发展,出现了一些新的理论。比如以矢量控制技术和直接转矩技术为核心的脉冲宽度调节技术,这些先进技术随着不断地发展逐渐成为社会的主流。目前有关我国智能电机控制技术发展研究已有很多的成果,并且达到了高精度、高控制的要求,它的控制速度能力不断加强,抗外界干扰能力也在不断加强,逐渐地满足人们的各种需求。

我国“十三五”规划纲要中明确提出节能减排等一些约束性指标,这使得电动车领域有了一个好的发展机遇,所以,加强电动车电机智能控制技术也是时代需求。因此,本书也着重阐述了电动车电机智能控制领域的一些技术,提高人们对电机智能控制技术的整体认识。

作者阅读大量相关著作和有关论文,对一些已经达成共识的成果,表示赞同且进行具体阐述加以推广。对电机智能控制技术领域仍存在的分歧和问题进行一些研究与分析,首先将这个领域的相关资料进行归类,然后进行对比分析,从而获取相应的观点和想法。其次,将自己关于电机智能控制技术领域构思和之前的一些研究成果进行回顾和梳理,不断进行改造。最后,将收集到的资料所带来的启发进行深入解读,并结合自身构思和研究的更新,形成全新的思路,以便于得出更为全面的研究成果。

本书写作是遵循以点带面的原则,详细地介绍了不同种类电机智能控制技术的各种知识。同时,以基础知识和实用知识为主,结合实际图例,深入挖掘电机智能控制技术内涵,达到了相关领域的理论标准。

本书一共分为6章。第1章着重阐述电机智能控制技术基础,第2章阐述了直流电机的原理及特性,第3章阐述了交流电机的原理及特性,第4章阐述了永磁同步电机无速度(位

置) 传感器控制与智能控制技术, 第5章详细描写了异步电机无速度传感器控制与智能控制技术, 第6章叙述了电机智能控制系统在电动车中的应用研究。

本书试图从理论上和实践上帮助大家深刻认识电机智能控制技术, 并且收录了该行业领域的最新成果, 不仅提高了全书的系统性, 而且还增加了其实用性。此外, 本书在撰写过程中, 借鉴了不少相关研究领域内一些专家学者的研究成果, 在此笔者深表谢意。然而囿于笔者水平和时间因素, 书中难免会出现诸多欠缺或不当之处, 还请广大读者朋友批评指正, 作者在这里表示衷心的感谢!

作者
2016年7月

目 录

第 1 章 电机智能控制技术基础	1
1.1 电机智能控制技术概述	1
1.2 电机智能控制的硬件基础	2
1.2.1 电机集成控制芯片	2
1.2.2 其他主要外围电路	3
1.3 电机的模糊控制	5
1.3.1 模糊控制的概述	5
1.3.2 电机模糊控制系统的设计	7
1.4 电机的神经网络控制	10
1.4.1 神经网络控制的概述	10
1.4.2 神经网络控制在实践中的应用	12
1.5 电机的模糊神经网络控制	15
1.5.1 模糊神经网络控制的概述	15
1.5.2 模糊神经网络控制的实践应用	17
第 2 章 直流电机的原理及特性	20
2.1 直流电机的工作原理	20
2.2 直流电机的机械特性	22
2.2.1 他励电机机械特性	22
2.2.2 串励电机机械特性	24
2.2.3 复励电机机械特性	25
2.2.4 直流电机换向	25
2.3 直流电机的起动、调速、控制与运行状态	26
2.3.1 直流电机的起动	26
2.3.2 直流电机的调速	26
2.3.3 直流电机的控制	27
2.3.4 直流电机的运行	28
第 3 章 交流电机的原理及特性	30
3.1 三相异步电机的工作原理	30
3.2 三相异步电机的机械特性	33
3.2.1 三相异步电机机械特性表达式	34
3.2.2 三相异步电机的固有机械特性和人为机械特性	35
3.3 三相异步电机的起动、调速、控制与运行	37
3.3.1 三相异步电机的起动	37

3.3.2	三相异步电机的调速	43
3.3.3	三相异步电机的控制与运行	49
3.4	单相异步电机	52
3.5	同步电机	54
3.5.1	同步电机的工作原理	54
3.5.2	同步电机的结构分类	55
3.5.3	同步电机的起动方式	55
第4章	永磁同步电机无速度（位置）传感器控制与智能控制技术	58
4.1	基于电机数学模型的直接计算法	58
4.1.1	直接计算方法	58
4.1.2	定子磁链、反电动势估算法	58
4.1.3	根据电感应变化的估计算法	59
4.2	模型参考自适应方法	60
4.3	状态观测器方法和扩展卡尔曼滤波器方法	61
4.3.1	状态观测器方法	61
4.3.2	扩展卡尔曼滤波器方法	63
4.4	高频信号注入法	68
4.4.1	旋转高频电压、电流信号注入法	68
4.4.2	脉振高频电压信号注入法	71
4.5	智能控制技术在电机参数估计中的应用	73
4.5.1	基于神经网络的转子位置辨识	73
4.5.2	神经网络观测器对转子位置的辨识	75
第5章	异步电机无速度传感器控制与智能控制技术	78
5.1	基于扩展卡尔曼滤波器的速度估计	78
5.1.1	扩展卡尔曼滤波器状态估计原理	78
5.1.2	扩展卡尔曼状态估计数学模型	79
5.1.3	扩展卡尔曼状态估计法	80
5.1.4	降阶扩展卡尔曼滤波器状态估计法	81
5.2	基于改进模型参考自适应的速度估计	83
5.2.1	可调模型与参考模型	83
5.2.2	自适应率	85
5.2.3	全阶闭环磁链观测器	86
5.3	神经网络技术在速度和参数辨识中的应用	89
5.3.1	基于前馈网络的速度辨识	90
5.3.2	基于递归网络的速度辨识	92
5.3.3	基于神经网络的转子磁链估计	92
5.3.4	基于神经网络的电阻估计	93
5.3.5	基于神经网络转子时间的常数估计	94
5.4	遗传算法和粒子群算法在电机参数辨识中的应用	94

5.4.1	遗传算法	95
5.4.2	粒子群算法	97
第6章	电机智能控制系统在电动车中的应用研究	100
6.1	车用电机智能控制系统的工作原理及结构	100
6.1.1	车用电机智能控制系统的工作原理	100
6.1.2	车用电机智能控制系统的结构	100
6.2	系统硬件模块设计及实现	103
6.2.1	电源模块硬件的设计	103
6.2.2	单片机模块硬件设计	105
6.2.3	驱动电路模块硬件设计	108
6.2.4	驱动控制模块的硬件设计	110
6.2.5	串口通信模块硬件设计	112
6.2.6	信号交互模块硬件设计	112
6.2.7	电机状态监测模块硬件设计	113
6.2.8	制动刹车控制模块硬件设计	114
6.3	系统软件设计及实现	115
6.3.1	从总体方案来看软件系统设计	115
6.3.2	参数配置界面	116
6.3.3	单片机程序	118
参考文献		122

第 1 章 电机智能控制技术基础

在现代社会中,电能是推动社会变革的重要动力之一。电机在电子、机械、运输、医疗、航天、冶金、化工、军事、农业以及轻工业等方面得到广泛应用,另外,电机的种类、规格、性能也在不断地更新,并且电机正在朝着智能控制方向发展。这就要求我们对电动的智能控制技术有全面而深入的了解与认识。

1.1 电机智能控制技术概述

电机有着自己独特的智能控制技术。传统的调速系统采用 PI (比例积分) 控制。PI 方法使用比较便捷,通过调整参数来进行控制,它有着很高的控制精度,应用十分广泛。PI 控制是一种线性控制,如果所要控制的对象具有非线性特性或有参变量发生变化,会使得 PI 控制的性能无法更好地表现出来,最终得到的属性也无法使人满意。若要对 PI 参数进行一个明确的确定,则需要对其参数值进行明确判定,这个参数值是具有一定局域性的值的优化值,所以,PI 控制不能从根本上解决性能和精度之间的矛盾。

智能控制理论是控制理论发展到一定阶段的必然产物,它包括模糊控制、神经网络控制、专家系统和遗传算法等,传统控制理论也能和智能控制方法相结合,形成一种复合控制,把各种控制方法的优点综合起来。智能控制从实质上来讲就是在控制时加入人的思维,这种控制可以对不确定性系统实现有效的控制,能够模拟人类的学习和适应能力。

智能控制理论所采用的方法不是单一的数学模型,它在数学模型中结合了一定的知识系统,能够模仿人类的经验和思维,通过自身的判断能力来控制这个复杂的系统。PI 控制与智能控制结合,是适应当前电机控制的发展趋势。此外,在其他的一些控制如矢量控制中,控制方法对电机的参数依赖性很大,但是电机的参数是不断变化的,如果不能适应这种参数变化,那么电机控制就会受到很大影响。在这种情况下,采取智能控制是非常有必要的,因为使用智能控制方法,可以有效解决因参数的变化而产生的影响。综上所述,智能控制的优点已经表现得非常显著,让其在电机控制领域得到广泛的应用,不仅可以帮助人们解决各种问题,而且还能提高人们控制电机的水平。

电机有着自己特殊的运作方式,它所运用到的方法和理论有很多类型,传统控制方式已经越来越不适应当前电机的发展需求,所以采用智能控制是必由之路。随着微电子技术的发展,各种专门控制器开始大量出现,这不仅为智能控制的发展提供了重要基础,而且也推动了智能控制在电机领域的快速发展。

高性能的电机控制系统和控制策略有着自己重要的研究方向,对其研究方向和研究策略的分析能够加深人们对电机智能控制的认知和理解。

第一,控制电机参数的变化和扰动新型非线性控制策略。要想从根本上对电机的控制进行深刻认知,就要运用非线性控制理论来研究其控制策略。随着电机的各种技术不断发展

和完善，电机控制的微处理器性能在很大程度上得到提升，能够进行更为复杂的控制算法。所以，越来越多的研究人员把重心放在对异步电机非线性控制策略的研究上。

第二，采用智能控制方法的新型控制策略。交流传动系统中采用了非常明确的数学模型，因此，在交流传动中要引入智能控制方法，可以有效地解决非线性、变结构、自寻优等问题，可以应对交流传动系统中传动参数变化、非线性等不利因素，能够提高整个控制系统性能。

第三，对高性能无速度传感器控制策略的研究。交流电机在生产生活中运用比较广泛，采用高性能无速度传感器控制策略，能够对电机转速进行准确的估算，能让整个系统提高对参数变化的适应能力，从而降低系统的复杂性。

1.2 电机智能控制的硬件基础

要对电机智能控制技术进行全面系统的认识，需要对其控制的硬件基础进行全面分析。电机智能控制技术包括电机的集成控制芯片和其他主要外围电路。

1.2.1 电机集成控制芯片

电机的集成控制芯片是电机控制系统的核心。当前，电机的控制器电路集成化发展趋势越来越明显，并且它具备着很多的优势。它的设计成本低、性能可靠、使用方便，是智能控制的重要基础。另外，电机控制的集成电路有着不同的分类和途径，控制集成电路在高性能电机领域的应用，进一步促进了电机智能控制的发展。

要对电机集成控制芯片进行深刻的认识，需要对电机微控制芯片和数字信号处理器芯片进行了解和分析。

1) 微控制器芯片

微控制器芯片是专门用于电机控制的芯片，它能够提供 I/O 接口的数量和片内存储器的大小，非常适用于有大量 I/O 操作的场合，但是，对那些精度要求高的电机控制系统并不适用。

微控制器的设计和使用也有非常高的标准，它一般采用的是标准 8 位或 16 位 CPU 核，由脉宽调制器、A/D 转换器和 SPI 串行接口等外围电路构成。在不同的产品或不同的生产厂家中有着不同的结构，所应用的领域也有所不同。目前在世界上有着不同的芯片制造公司，它们专门生产用于电机控制的微控制器芯片系列产品。这些产品能够适应不同电机的控制系统，并能在一定程度上提高电机的控制精度，从而不断推动电机智能控制的向前发展。

2) 数字信号处理器 (DSP) 芯片

DSP 芯片也是电机集成控制芯片的一种重要类型。在 DSP 内部中它包含 A/D 转换器、数字 I/O 接口、串口通信、CAN 总线控制器、PWM (脉冲宽度调制) 信号输出等接口电路，所以，它使电机控制硬件设计更加的灵活、简便。DSP 芯片运算能力非常强大，能够为智能控制提供一个好的硬件基础。随着这种 DSP 芯片的发展，它的应用也越来越广泛，逐渐替代了其他控制器系列的产品，成为当前一种比较流行的数字信号芯片。通过对不同电机控制的 DSP 产品性能进行比较，就可以很明显地看出它所具有的优缺点 (表 1-1)。

表 1-1 不同电机控制 DSP 产品性能比较

特性	型号		
	TMS320F2812	ADMC401	MC56F807
处理速度	150MIPS	26MIPS	80MIPS
时钟频率	150 MHz	26 MHz	80 MHz
体系结构	改进的哈佛结构	改进的哈佛结构	改进的哈佛结构
内部程序空间	128 K×16 bit FLASH	2 K×24 bit DPROM 2 K×24 bit PRAM	60 K×16 bit FLASH 2 K×16 bit PRAM
内部数据空间	18 K×16 bit SRAM	1 K×16 bit DRAM	8 K×16 bit FLASH 4 K×16 bit DRAM
Boot Load	4 K×16 bit BootROM	无	2 K×16 bit Boot ROM
数字 I/O（专用/共用）	56	12	14/18
脉宽调制（PWM）	16 路	3 相 6 路，16 位 2 相位辅助 PWM	12 路
A/D 转换器	16 路 12 位（80 ns）	8 路 12 位，流水线（2 μs）	16 路 12 位（2 μs）
SCI	2	1	2
SPI	1	1	1
CAN2.0B	1	无	1
输入捕捉单元	6	2	4
正交编码电路	2	1	2
看门狗定时器	有	有	有
程序加密	有	无	无
封装	128 脚 LQFP	144 脚 LQFP	160 脚 LQFP

1.2.2 其他主要外围电路

电机智能控制硬件除了电机集成控制芯片以外，还包括一些其他的主要外围电路，对这些主要外围电路进行了解是非常必要的。

1) 信号检测与转换

信号的检测与转换是电机控制系统中不可缺少的重要组成部分。不管处于什么系统下，都要对其进行必要的信号检测，这样才能保证电机正常、安全地运行。对信号进行检测时可以分为电量和非电量两大类，在电机控制系统中，我们对信号的检测主要借助电压、电流、温度、转子位置、转速、转矩等物理量。我们就通过对这些要素的分析，来提高对信号检测与转换的认识。

(1) 电流检测法。

电机只要工作，它的内部就一定存在电流，因此，对电机电流进行检测可以为电机的控

制提供有效的依据。目前，我们对电流的检测所运用的主要方法是电阻法、电流互感器法和霍尔效应电流传感器法。电阻法是通过对流经电阻的电流所产生电压的检测，来获得流经电阻电流的大小，具体如图 1-1 所示。

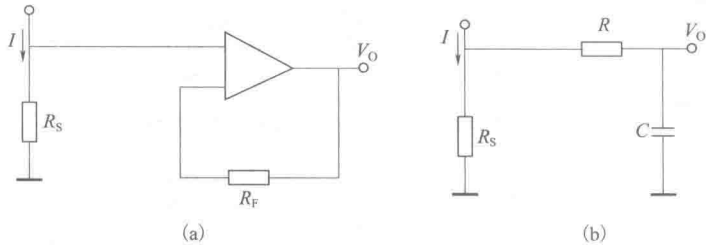


图 1-1 电阻法检测电流原理图

这种电阻法检测电流的方式有着不可取代的优点。它的设备简单、成本较低、响应速度快，是运用较为广泛的一种检测方法。电流互感器，跟变压器有一定的相似性，它利用交流电的电磁感应原理来对电流进行测量，可以对那些高压大电流进行检测，但是它在检测低频信号时精度不够。霍尔效应电流传感器法，也是使用较多的一种方法。它是采用霍尔效应和磁场平衡原理设计的精密电流检测元件，它能够对直流电流和交流电流都进行测量，测量的精度高，但是价格也高。

(2) 电压检测法。

电压也是影响电机控制的变量之一。电压检测的方法也有很多，它包括直接测量法、电阻分压法、电压互感器法和霍尔效应电压传感器法。在采用这些方法前要对电压大小进行准确的判定。当电压较低时，可以直接输入放大缓冲器进行测量；当电压较高时，可以通过电阻改变电压来进行测量，如果是交流的高压，可采用电压互感器。而霍尔效应电压传感器和霍尔效应电流传感器类似，不同的是电流传感器被测电流的导体匝数很少，电压传感器的匝数较多。

(3) 温度测试法。

根据温度的不同可以有不同的检测方法，一般会采用接触测量和非接触测量两种类型。接触测量就是使用对温度比较敏感的元件，来直接对温度进行感应的测量方法；非接触式测量就是利用物体的热辐射、色谱等变化来对电机的温度进行检测。在实践中人们运用比较广泛的温度测试法是接触测量法。

(4) 转子位置测试法。

在电机控制系统中，要对转子位置进行检测可以通过微电机解算元件、光电元件、磁敏元件、电磁感应元件等设备进行。其中测量精度最高的是光电元件和微电机解算元件，电磁感应元件和磁敏元件是用来检测那些固定绕组的换相位置。这些方法都能对转子位置进行准确的检测。

(5) 转速检测法。

电机的转子由于受各个因素的影响，转速会在一定条件下发生变化，这个变化可以通过转子的移动距离来看出。所以，可以通过转子位置检测信号并配合定时器计时来确定转速的大小，同时可以采用测速发电机来进行测速。

光电编码器测速方法是一种重要的测速方法，它可以分为 M 法、T 法和 M/T 法等几种

方式。M法是对频率进行检测，一般用于高转速的测量。假如，一个 N 线的光电编码器，它每旋转一周就会有 $4N$ 个脉冲，在一定时间 T_c 计数器能记录出的脉冲数为 M_1 ，电机转速的公式表示为：

$$n = \frac{15M_1}{NT_c}$$

T法是对周期的一种测试方法，在一个脉冲的周期内对时钟脉冲信号进行计数来测量转速。它的电机转速公式可以表示为：

$$n = \frac{15f_{clk}}{NM_2}$$

式中： f_{clk} 为时钟频率； M_2 为计数器记录脉冲数。

M/T法测速是把M法与T法两者糅合起来的一种测速方式，它的电机转速公式表示为：

$$n = \frac{15M_1 f_{clk}}{NM_2}$$

这些方法都是电机进行测速的主要方法，它们有着各自的优点，能对较大范围的转速进行测量，测量的精度很高，在实践中应用也非常广泛。

2) 智能功率驱动芯片

智能功率驱动芯片（Intelligent Power Module, IPM）是一种重要的混合集成功率器件，它是把多种器件集合在一个模块内的一种重要的驱动芯片。它由IPM构成，不需要设置专门的驱动电路、故障检测和保护电路，它的结构比较简化，使用也比较方便，调试简单，可靠性也有保障。它的驱动电路是在功率模块中放置的，不仅减少了连接线路，而且提高了工作效率。

另外，采用IPM构成电路能可靠导通与关断，不容易受干扰。同时，它也有很好的故障保护措施，通态损耗和开关损耗都比较低。智能功率驱动芯片IPM适应了当前功率元件的发展方向，为智能控制的应用与发展奠定了良好的基础，并且在电子领域和传动控制领域中得到广泛的应用。

智能功率驱动芯片主要生产厂家和产品有日本三菱公司PM系列、东芝公司的MIG系列、富士公司6MBP/7MBP/7MBR系列、德国泰科TYCO公司的PIMs系列、美国国际整流公司IR的IRAM系列等。这些产品都是根据不同的特点和需求来进行设计的，丰富了智能功率驱动芯片的类型。

1.3 电机的模糊控制

电机的模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量、模糊逻辑推理为基础的计算机控制方法。它还根据人工控制规则组织控制决策表，并由决策表来决定控制量的大小。对电机模糊控制概念内涵和模糊控制系统设计进行深刻认识，可以提高人们对电机的模糊控制。

1.3.1 模糊控制的概述

模糊控制的核心是采用模糊集合论，把人类自然语言的控制策略转换为相关机器设备能够接受的算法语言，并能逐渐模拟出人的思维方式对受控对象进行控制，所控制的输出是确定的。

模糊集合和模糊逻辑的基本概念包括：论域、语言变量、语言值、模糊集合、隶属函数、模糊集合的基本运算、模糊推理、知识库、模糊化、模糊关系、去模糊化等方面的内容，这些具体内容都是影响模糊控制的重要因素。在模糊控制系统中，包括了模糊化单元、知识库、模糊推理机构和去模糊化单元等方法的内容，具体的模糊系统结构图如图 1-2 所示。

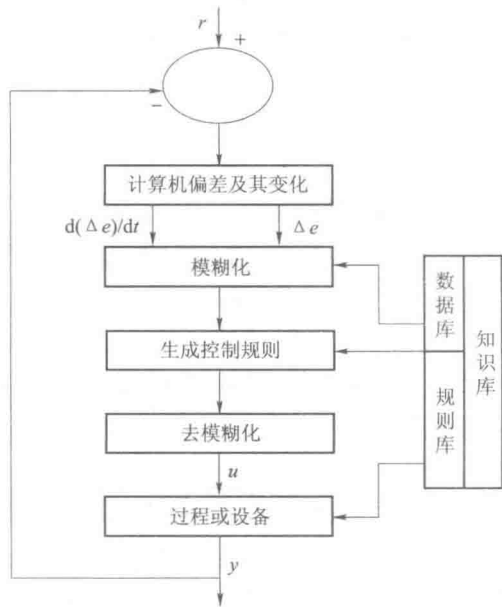


图 1-2 模糊系统结构图

同样模糊控制系统也有自己独特的系统运算原理。它的计算原理是我们深刻认识模糊推理计算的重要依据。模糊推理计算过程如图 1-3 所示。

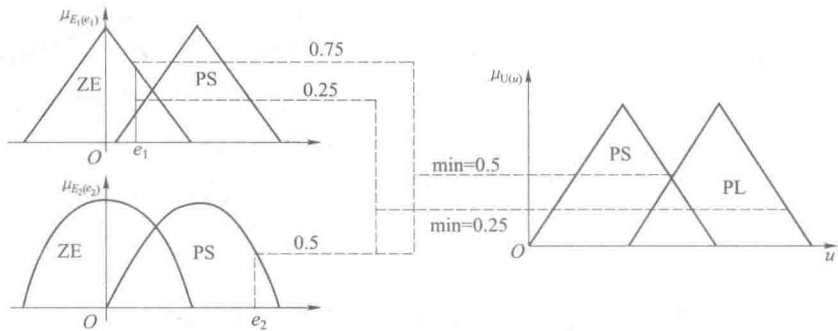


图 1-3 模糊推理计算过程

根据上图用简单的事例来说明模糊系统运算原理。设系统有两个输入值 e_1 、 e_2 和一个输出值 u 。它们都是与语言变量（“速度”“转矩”）有关的数值变量。每个语言变量的语言取值“ZE（零）”“PL（正大）”“PS（正小）”中的两个，并用各自相应的模糊集表示。给出 e_1 、 e_2 的数值，按照单态体模糊化方法把它们分别映射到模糊集。相应的隶属度： e_1 映射到“ZE”的为 0.75，映射到“PS”的为 0.25； e_2 映射到“PS”的为 0.5。然后根据下面规则（假设已存放在规则库中）：if e_1 is ZE and e_2 is PS then u is PS, if e_1 is PS and e_2 is PS then u is

PL, 对其中的前提和模糊关系应用 MAX - MIN 推理方法求得输出模糊集。最后选择重心法或其他方法进行去模糊化。

1.3.2 电机模糊控制系统的设计

电机模糊控制系统有着明确的设计方法, 采用模糊逻辑控制器与直接转矩控制相结合, 可以改善系统的性能。模糊控制系统设计包括选择模糊变量、确定模糊规则、把对象模糊化、设定模糊推理和算法。

1) 对模糊变量进行选择

模糊变量是影响模糊控制器的重要因素, 它能影响逆变器的开关状态。一般模糊器所用的是 3 输入 1 输出的结构, 也就是它有 3 个模糊输入变量和 1 个输出控制变量。三个输入变量是 e_ψ 、 e_T 、 θ , 输出控制变量是逆变器开关状态控制量 u_v , 这就好比是所要加到电机端子上去的电压空间矢量。

当第一个模糊输入变量是 e_ψ 时, 给定定子磁链与实际定子磁链值的差的公式如是: $e_\psi = \Psi_1^* - \Psi_1$; 当第二个模糊输入变量是 e_T 时, 给定转矩与计算的实际转矩之间的差的公式是: $e_T = T^* - T_e$; 当第三个模糊输入变量为 θ 时, 公式为: $\theta = \arctan(\Psi_{\beta 1} / \Psi_{\alpha 1})$ 。

2) 把对象模糊化

模糊化实质上是一个变化的过程, 就是把数值变量变成语言变量的过程。因为在模糊控制器中, 输入主要集中在输入变量内的清晰数值, 输出主要集中在语言集的隶属度。

要把输入变量的清晰值进行模糊化的时候, 主要通过把连续变量离散化和离散化变量模糊化手段来进行的。然后把变量的量化论域分为几段, 并用几个模糊集来表示。用最小的规则达到最大的控制目标, 这是选择模糊集数目的原则。可以通过模糊变量隶属函数来对其进行深刻理解, 在本事例中, 磁链偏差模糊变量的论域分为三个相互交叠的模糊集: 正磁链偏差 (P_ψ)、零磁链偏差 (Z_ψ)、负磁链偏差 (N_ψ); 转矩偏差模糊变量的论域分为五个相互交叠的模糊集: 正大偏差 (PL_T)、正小偏差 (PS_T)、零偏差 (ZE_T)、负小偏差 (NS_T)、负大偏差 (NL_T)。其隶属函数如图 1-4a、b 所示。第三个模糊变量, 即定子磁通角的论域分为 12 个模糊集 ($\theta_1 \sim \theta_{12}$), 如图 1-4 所示。

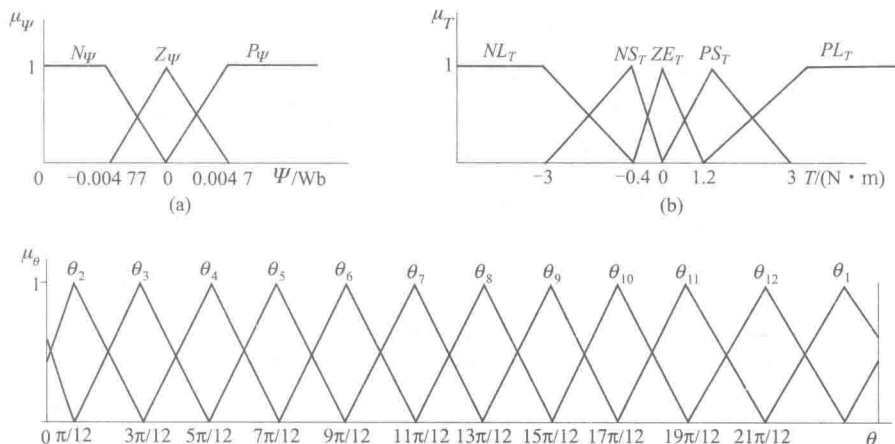


图 1-4 模糊变量隶属函数

输出的变量不需要进行模糊化，因为开关的状态和电压空间矢量都是很清晰的，不需要模糊的隶属函数。在两点式逆变器中有这种情况，它有 8 个不同的开关状态，但事实上只有 7 种电压空间矢量。

3) 对模糊规则进行确定

在模糊控制器中，要对模糊规则进行明确的确定。它的每一条控制规则都可以借助模糊输入变量 e_ψ 、 e_T 、 θ 和输出变量 u_v 表示。它的有关控制规则可以写成： $\tilde{R}_i$: if e_ψ is $\tilde{A}_i$, e_T is $\tilde{B}_i$ and θ is $\tilde{C}_i$ then u_v is $\tilde{N}_i$ ，在这个式子中 $\tilde{A}_i$ 、 $\tilde{B}_i$ 、 $\tilde{C}_i$ 、 $\tilde{N}_i$ 为有关的模糊集。

模糊规则是根据专家的经验 and 已经获得的知识来确定的。可以利用建立规则库的矢量图来确定规则表达式。规则库的矢量图如图 1-5 所示。

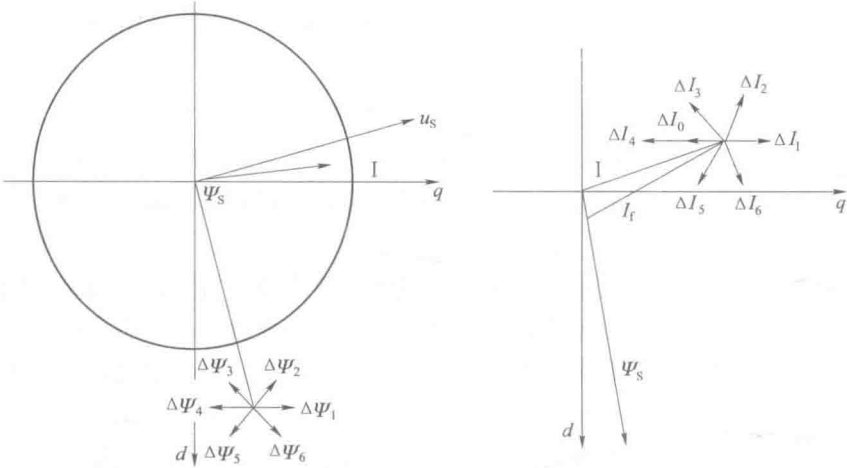


图 1-5 规则库的矢量图

图 1-5 中电压空间矢量（用下标数字表示）5、6 和 1 能使磁通增加，而 3、4、2 会使磁通减少；6、1、2 能使转矩增加，3、4、5 会使转矩减小。要使得转矩略微增加磁通显著增加，那么就选择电压空间矢量 6；反过来的话，可选择电压空间矢量 1；要使磁通略有减少，转矩略有增加，那么选择电压空间矢量 2；要使磁通显著减小，转矩稍有减少，那么选择电压空间矢量 3；要使磁通稍有减少，转矩显著减小，那么就选择电压空间矢量 4；要使磁通稍有增大，转矩显著减小，那么就选择电压空间矢量 5；如果只是略微减少转矩，而使磁通表示不变的话，选择电压空间矢量 0。所以说磁链空间矢量位置变化，所选的电压矢量也会不同。合在一起有 180 个控制规则，见表 1-2。

表 1-2 异步电机直接转矩控制的模糊控制规则

	θ_1			θ_2			θ_3			θ_4			θ_5			θ_6		
e_T	e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ		
	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P
NL	5	5	6	5	6	6	1	2	2	6	1	1	1	1	2	1	1	2
NS	6	2	2	6	2	2	1	3	3	6	2	2	6	2	2	1	3	3
ZE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

续表

	θ_1			θ_2			θ_3			θ_4			θ_5			θ_6		
e_T	e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ		
	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P
PS	5	0	3	5	0	4	6	0	4	6	0	5	1	0	3	1	0	6
PL	4	4	2	5	4	3	5	5	3	6	5	4	6	6	4	1	6	5
	θ_7			θ_8			θ_9			θ_{10}			θ_{11}			θ_{12}		
e_T	e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ			e_ψ		
	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P
NL	2	2	3	2	3	3	3	3	4	3	4	4	4	4	5	4	5	5
NS	1	3	3	2	4	4	2	4	4	3	5	5	3	5	5	4	6	6
ZE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PS	6	0	5	1	0	5	1	0	6	2	0	6	2	0	1	3	0	1
PL	6	5	4	6	6	4	1	6	5	1	1	5	2	1	6	2	2	6

4) 模糊算法与推理

模糊控制也有着明确的算法与推理。模糊推理需要在模糊控制器这个环境下，根据模糊量和模糊控制规则，来求解模糊关系方程式，然后得到模糊控制量。

计算第 i 个规则的加权系数，可用公式表示为：

$$\alpha_i = \min(\mu_\psi(e_\psi), \mu(e_T), \mu(\theta))$$

应用 Mandani 的最少运算规则作为模糊关系函数，通过模糊推理可以把第 i 个规则得到的相应控制输出，它的表达式为：

$$\mu'_{vi}(u_v) = \min(\alpha_i, \mu_{vi}(u_v))$$

逐点确定输出 u_v 的隶属度后的总推理结果为：

$$\mu_v(u_v) = \max_{i=1}^{180}(\mu'_{vi}(u_v)) = \{[\alpha_1 \wedge \mu_{v1}] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{v2}] \cdots \vee [\alpha_{180} \wedge \mu_{v180}]\}$$

5) 去模糊化

去模糊化是模糊控制系统中的一个重要内容，这个过程中主要输入的是模糊集，输出的是精确的数值。去模糊化采用的方法有很多，主要是在计算量和精确度方面做出有效的选择。通过重心法可以算出：

$$u_v = \frac{\sum_{i=1}^{180} \mu'_{vi}(u_v) u_{vi}}{\sum_{i=1}^{180} \mu'_{vi}}$$

根据这个公式可以进行有效的去模糊化计算，能有效地进行模糊化控制，这是电机模糊控制系统的重要组成部分。